

F I 기법을 이용한 ton급 컨테이너 크레인의 내풍구조 안정성 평가

The Wind Resistant Structural Stability Evaluation of a 50-ton Container Crane using FSI

*이성욱¹, 안태원², 이수홍³, 한동섭⁴, 김태형⁵, #한근조⁶

*S.W.Lee¹, T.W.Ahn², S.H.Lee³, D.S.Han⁴, T.H.Kim⁵, #G.J.Han(gjhan@dau.ac.kr)⁶

^{1,2,3} 동아대학교 대학원 기계공학과, ⁴동아대학교 BK21 사업단, ⁵경남정보대학 기계자동차산업계열, ⁶동아대학교 기계공학과

Key words : Container Crane, Wind Resistant Structural Stability, Uplift Force, Fluid-Structure Interaction

1. 서론

컨테이너를 선박에 양적하하는 장비인 컨테이너 크레인은 일반적으로 차폐물이 거의 없는 항만에 설치되어 사용되고 있으며, 자체 높이가 현재 항만에서 주로 사용되고 있는 50ton급 컨테이너 크레인의 경우 계류 시(붐(Boom)을 올렸을 경우) 최대 100m에 달하게 되므로 바람에 매우 큰 영향을 받게 된다. 특히 2003년 태풍 ‘매미’ 내습 시에는 부산항의 신감만 및 자성대부두에서 강풍에 의하여 총 11기의 컨테이너 크레인이 파손되어 부산항 기능이 일부 마비됨으로써 막대한 물류 손실이 발생하기도 하였다.

따라서 이와 같은 풍하중의 영향을 최소화시키기 위하여 컨테이너 크레인에는 타이다운(Tie-down)과 스토이지 핀(Stowage pin)과 같은 계류장치를 설치하여 강풍으로 인하여 작업이 중지될 경우(휴지 시) 컨테이너 크레인을 지정된 위치에 고정시켜 전도와 이탈을 방지하고 있다. 이와 같은 계류장치는 일반적으로 유한요소해석을 이용한 구조해석을 통하여 설계 최대 풍하중이 컨테이너 크레인에 작용할 때를 가정하여 각 지지점에서 발생하는 반력(수직력)을 분석하여 컨테이너 크레인의 전도를 방지하는 타이다운의 직경을 설계하거나 지지점의 전단력(수평력)을 구하여 컨테이너 크레인의 이탈을 방지하는 스토이지 핀 등을 설계하고 있다.¹⁾

그러므로 풍하중에 의한 컨테이너 크레인의 전도 방지를 위한 계류장치 설계를 위해서는 무엇보다도 컨테이너 크레인에 작용되는 풍하중을 정확하게 산정하는 것이 중요하다. 하지만 기존의 컨테이너 크레인 내풍 설계에서는 풍속에 따른 고도별 풍압력을 산출하고 이를 유한요소해석을 통하여 분석한 결과를 내풍구조 설계에 적용하였다. 그러나 이러한 방법은 풍하중을 과도하게 높게 산정함으로써 컨테이너 크레인 각 지지점의 전도력이 실제와 다르게 산정되는 단점을 가지고 있다.²⁾

따라서 본 연구에서는 이러한 오차를 최소화시키기 위하여 유동해석 프로그램인 ANSYS CFX를 이용하여 컨테이너 크레인에 대한 유동해석을 수행하고 이 결과로써 얻어지는 컨테이너 크레인 표면의 압력분포를 ANSYS Workbench를 사용하여 직접적으로 구조해석의 하중조건으로 적용하는 유동-구조 연성해석(FSI analysis)을 수행하였다.

2. 전산유동해석

2.1. 해석조건

풍하중이 컨테이너 크레인의 구조적 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 현재 항만에서 널리 사용되고 있는 50톤급 컨테이너 크레인이 계류를 위해 붐을 들어 올린 상태를 가정하였으며, 이 때 풍속은 64m 높이에서 75m/s가 되도록 하였다. 그리고 고도에 따른 풍속은 ‘도로교설계기준’을 의거하여 변화할 수 있도록 기류를 모델링하였다. 풍향은 컨테이너 크레인이 대칭형으로 되어 있으므로 붐 정면을 0°라 할 때 반시계 방향으로 0°에서 180°까지 10°간격으로 작용시켰으며, 공기 밀도는 0.125kgf·s²/m⁴로 하였다.

2.2. 유동해석모델 및 격자

본 연구에서는 컨테이너 크레인 주변의 유동 양상과 표면압력 분포를 확인하기 위해 가능한 한 실제 컨테이너 크레인과 유사하게 모델링하였으나 요소망 생성을 고려하여 하중에 크게 영향을

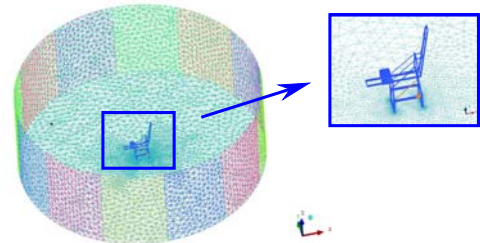


Fig. 1 Meshed shape for computational fluid dynamics

주지 않는 미세한 구조물과 백 스테이는 생략하였다.

컨테이너 크레인의 전산유동해석을 위한 유동장은 Fig. 1과 같이 원통형상으로 구성하고 유동장 외부 표면을 10°간격으로 분할하여 풍향에 따른 풍속 작용부 설정을 용이하게 하였으며, 풍향변화에 따른 격자망 생성 작업의 반복을 회피할 수 있도록 하였다. 또한 이러한 방법은 풍향에 따른 유동해석 격자망이 동일하게 됨으로써 격자의 형상 및 수의 차이로 인한 오차를 줄일 수 있으므로 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 장점이 있다.

또한, 컨테이너 크레인 외부 유동장의 크기를 직경 600m, 높이 200m로 크게 함으로서 경계면 간섭으로 인해 발생할 수 있는 오차를 줄일 수 있도록 하였다.

격자생성은 격자 생성 전용 프로그램인 ANSYS ICEM CFD 10을 사용하였으며, 격자수는 약 258만개이며, 절점수는 68만개로 생성하였다. 곡면 및 좁은 면에서는 격자망이 자연스럽게 변하도록 설정하였다. 또한 크레인 표면 및 벽면 근처에서는 경계층에 의한 영향을 고려하여 프리즘 요소 층을 5층 이상으로 삽입하였다.

2.3. 경계조건

전산유동해석은 ANSYS CFX 10.0을 이용하여 수행되었으며 난류모델은 k-ε 모델을 사용하였다.

경계조건은 바닥과 크레인의 표면은 슬립이 발생하지 않도록 하였으며, 윗면은 개방(opening) 조건을 사용함으로써 유동장 내부와 외부와의 조건이 동일하도록 하였다.

3. 유동-구조 연성해석

3.1. 해석모델

FSI 기법을 이용한 연성해석을 수행할 경우 유동해석을 통한 표면의 압력정보를 구조해석 시 동일한 위치에 있는 표면으로 전달하기 때문에 본 연구에서는 컨테이너 크레인의 외부 형상을 전산유동해석에 사용된 모델과 동일하게 구성한 후 모델 내부에 실제 50톤급 컨테이너 크레인의 도면을 참고하여 여러 가지 형상의 보강재를 세부적으로 모델링하였다. 그리고 연성해석을 위하여 절점당 3개의 자유도(ux, uy, uz)를 갖는 사면체 및 육면체 요소를 사용하여 요소분할(mesh)하였다. 연성해석에 적용된 요소 수는 약 35만개이며, 절점은 약 123만개 가량이다.

3.2. 하중 및 경계조건

본 연구에서 적용한 하중조건은 크게 세 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 전산유동해석에 의한 컨테이너 크레인 표면의 풍압력이며, 두 번째는 컨테이너 크레인 자체의 자중이며, 마지막

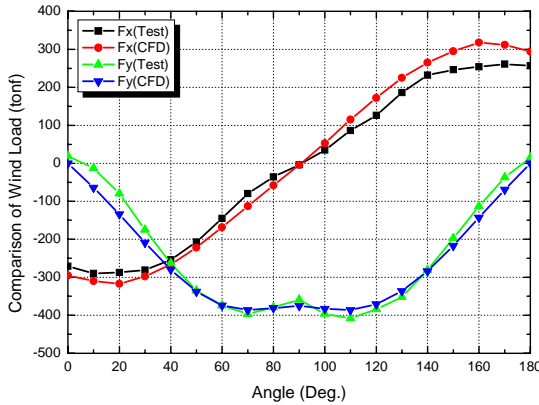


Fig. 2 Comparison of wind load between test and CFD

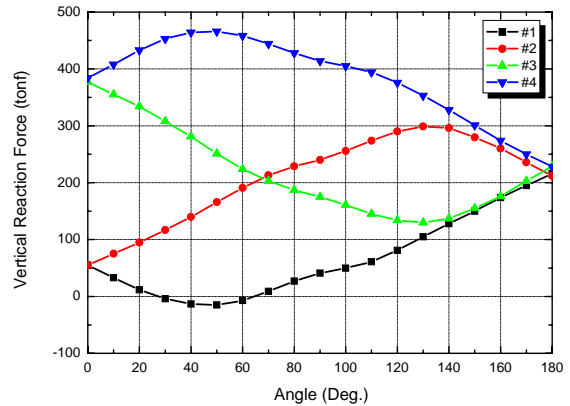


Fig. 3 Vertical reaction force variation according to incidence angle of wind load

세 번째는 컨테이너 크레인에 설치되는 각종 부속장치의 무게로 인한 하중이다.

전산유동해석에 의한 표면 풍압력은 연성해석 시 ANSYS Workbench에서 저장되어 있는 전산유동해석 결과파일의 압력 분포를 가져오게 되며, 컨테이너 크레인의 자중은 3차원으로 모델링된 컨테이너 크레인 모델의 체적에 밀도를 적용하여 계산하게 된다. 이 때 계단과 난관 등 일부 생략된 구조물과 기계실 등은 각부 구조물의 자중을 고려하여 설치되는 위치의 구조물 밀도를 적절하게 변경하였다. 그리고 컨테이너 크레인에 설치되는 부속장치로 인한 하중은 컨테이너 크레인 구조계산서에 명시된 자료를 참고로 하여 적합한 위치에 하중으로 작용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1. 전산유동해석

Fig. 2는 전산유동해석을 통하여 얻어진 X방향(해측에서 육측)과 Y방향(레일방향)의 풍하중을 이 등³⁾이 동일한 컨테이너 크레인의 1/200 축소모형을 사용한 풍력실험결과를 비교한 것이다.

풍력실험과 전산유동해석을 통해 얻어진 X와 Y방향 풍하중은 모든 풍향에서 거의 동일한 분포를 보이는 것을 확인할 수 있다. 풍력실험을 기준으로 최대 풍하중이 발생하는 풍향에서 각각의 풍하중을 비교해 보면 X방향의 경우 10°~30°의 풍향에서 발생하게 되는데, 전산유동해석도 이와 동일한 각도에서 최대풍하중이 발생하였으며 실험과의 오차는 6~10% 정도로 해석의 수렴성을 높이기 위해 난관과 백 스테이 등을 생략한 점을 감안하면 결과의 신뢰성이 매우 높다고 할 수 있다. 단, 150°~170°의 풍향에서는 실험과의 오차가 20~25% 가량 발생되었는데 이는 풍력실험에서 난간 등의 구조물과 기계실에 의한 차폐효과 및 유동장 변화가 풍하중에 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 그리고 Y방향 풍하중의 경우 풍력실험에서 최대 풍하중은 100°~110° 사이에서 발생되었는데, 전산유동해석에서도 이와 동일한 결과를 보였으며, 이때 오차는 3~6%였다.

컨테이너 크레인의 내풍구조 안정성 평가를 위하여 FSI 기법을 적용하기 위해서는 우선적으로 수행되는 전산유동해석의 결과가 신뢰성이 있어야 이후의 구조해석에서 정확한 결과를 얻을 수 있는데, 본 연구에서는 풍력실험을 통해 얻어진 풍하중과 전산유동해석의 결과 비교를 통하여 전산유동해석의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

3.2. 유동-구조 연성해석

본 연구에서는 3.1에서 수행된 전산유동해석의 결과로 얻을 수 있는 컨테이너 크레인 표면의 압력분포를 구조해석의 하중조건으로 작용하여 유동-구조 연성해석을 수행하였다.

Fig. 3은 풍향변화에 따른 50톤급 컨테이너 크레인의 내풍구조 안정성을 분석하기 위하여 연성해석을 통하여 얻어진 각 지지점의 수직반력을 분석한 결과를 나타내고 있다.

풍하중이 불을 기준(0°)으로 반시계 방향으로 작용하게 되므

로 0°에서는 해측에 위치한 #1과 #2가 동일하였으며, 육측에 위치한 #3과 #4에서 동일한 반력이 발생되었다. 이와 같이 0°에서 발생하는 반력이 서로 다른 원인은 자중의 15% 가량을 차지하는 기계실이 육측의 #3, #4 지지점 상부에 위치하고 있으므로 해측에서 비해 육측 지지점에 컨테이너 크레인의 자중에 의해 작용되는 수직력이 30% 가량 더 크기 때문이다.

그러나 각 지지점의 반력은 반시계 방향으로 풍향이 변화함에 따라 풍향을 직접적으로 받게 되는 #1 지지점이 전도되려 하므로 수직반력이 점차 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이와 반대로 #1 지지점의 대각선 방향에 위치한 #4 지지점은 수직반력이 높아지다 90° 부근에서 풍하중의 작용방향이 해측에서 육측쪽으로 변화하기 때문에 점차 낮아졌다. #2와 #3 지지점은 이와 반대 경향을 나타내었다.

유동-구조 연성해석 결과 풍향이 30°~60° 사이일 때 #1 지지점에서 컨테이너 크레인의 지지점이 전도되는 경우를 나타내는 (-)반력이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 FSI 기법을 이용하여 항만에서 널리 사용되는 50ton급 컨테이너 크레인의 내풍구조 안정성 평가를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 전산유동해석은 풍력실험과 유사한 결과를 보이며 최대 풍하중의 경우 X방향은 6~10%, Y방향은 3~6% 가량의 오차를 보이는 신뢰성 있는 결과를 얻었다.
2. 연성해석을 통한 지지점의 반력은 풍방향에 위치한 지지점에서 가장 낮게 발생되었다.
3. 풍향이 30°~60° 사이일 때 #1 지지점에서 컨테이너 크레인의 지지점이 전도되는 경우를 나타내는 (-)반력이 발생되었다.

후기

“본 연구는 정보통신부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (IITA-2006-(C1090-0602-0013))

참고문헌

1. 한근조, 이호, 심재준, 한동섭, 안찬우, 전영환, “컨테이너 크레인용 췌기형 레일 클램프의 췌기각에 대한 연구,” 한국정밀공학회지, 21, 119-126, 2004.
2. 이성욱, 심재준, 한동섭, 박종서, 한근조, 이권순, 김태형, “풍하중이 컨테이너 크레인의 안정성에 미치는 영향 분석,” 한국정밀공학회지, 22, 148-155, 2005.
3. Lee,S.W., Shim,J.J., Han,D.S., Han,G.J. and Lee,K.S., "An Experimental Analysis of the Effect of Wind Load on the Stability of a Container Crane," JMST, 21, 448-454, 2007.